

М. И. Толстой, Н. В. Костенко, Ю. Л. Гасанов

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНИТОИДАХ ФОРМАЦИИ РАПАКИВИ УКРАИНСКОГО И БАЛТИЙСКОГО ЩИТОВ И ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Л. С. Галецким)

Проведено геохімічне вивчення гранітоїдів формації рапаківи Українського та Балтійського щитів із залученням кількісних методів дослідження. Встановлено послідовність формування порід, визначено ступінь їх рідкісності, виділено типи геохімічної спеціалізації. Висловлено припущення щодо геодинамічних умов становлення гранітоїдів.

Geochemical studying of granitoids of rapakivi formation of the Ukrainian and Baltic shields with attraction of quantitative methods of researches is spent. There was established the sequence of formation of the rocks, their degree of accumulation of rare metals, types of geochemical specialisation. Assumptions concerning geodynamic conditions of granitoids formation are stated.

Постановка вопроса

Для исследователей гранитоиды формации рапакиви интересны не только в теоретическом отношении как специфические образования этапа стабилизации фундамента древних платформ, но и как металлогенически перспективные природные объекты на эндогенное оруденение, главным образом редкометалльное. Их практическая значимость, в частности, была основной мотивацией к проведению комплексного изучения вещественного состава пород этой формации. Такие работы были выполнены в 80-е годы прошлого столетия общими усилиями геологов Киевского и Львовского университетов под руководством проф. М. И. Толстого. Эти исследования проводились практически одновременно на территориях Украинского (УЩ) и Балтийского (БЩ) щитов с соблюдением единой методики опробования пород, их лабораторного анализа и статистической обработки полученной аналитической информации.

Анализ последних исследований

Гранитоидам формации рапакиви Восточно-Европейской платформы (ВЕП) посвящено значительное количество публикаций. Среди них монографии Л. П. Свириденко [16], Л. В. Левковского [10], И. Л. Личака

[11], В. П. Бухарева [6], коллективные монографии Д. А. Великославинского и др. [1], К. Е. Есипчука и др. [14], М. И. Толстого и др. [13], ряд работ А. М. Беляева и Б. К. Львова [3], А. М. Беляева [2], Е. В. Шаркова [20], А. М. Ларина [9].

Несмотря на длительную историю исследований, некоторые вопросы, касающиеся последовательности образования гранитоидов формации рапакиви, их сопоставления с аналогичными породами других регионов, геодинамических условий формирования, имеют дискуссионный характер. Как пример можно привести мнения исследователей относительно количества гранитоидных фаз, принимающих участие в строении Салминского массива (БЩ). Так, в соответствии с данными Т. Н. Билибиной [5] – одна, Л. П. Свириденко [16] – пять, Р. А. Хазова [19] – три, Д. А. Великославинского и др. [1] – пять, А. М. Беляева и др. [3] – три, В. М. Ларина [9] – четыре разных по возрасту "эпизодов магматической деятельности". Невьясненной остается тектоническая природа гранитов формации рапакиви: анорогенные или орогенные это образования? Авторы статьи пытаются аргументировать также свою точку зрения относительно геодинамических условий формирования этих уникальных в геологической истории Земли пород.

Основной целью работы является установление характерных отличий элементного состава ряда разновидностей гранито-

© М. И. Толстой, Н. В. Костенко, Ю. Л. Гасанов, 2011

идов формации рапакиви и на этом основании определение последовательности их становления, степени геохимической и металлогенической специализации, корреляционных взаимоотношений, а также возможных источников их образования.

Изложение основного материала

Структурно массивы исследуемых гранитоидов формации рапакиви в ассоциации с анокситами участвуют в формировании громадного по протяженности Приазовско-Прибалтийского [15] плутонического пояса, который дискретно прослеживается вдоль западного края ВЕП: от территории УЩ и до БЩ. Граниты рапакиви УЩ известны в пределах Ингульского (Корсунь-Новомиргородский плутон) и Волынского (Коростенский плутон) мегаблоков. Хотя И. Б. Щербаков [21] допускает, что и в Приазовье есть граниты типа рапакиви. По его мнению, это диаллаговые граниты, с которыми непосредственно контактируют гранитоиды Октябрьского комплекса.

Массивы гранитов рапакиви Салминский и Выборгский приурочены к южной части БЩ (Фенноскандинавского). Мнения исследователей относительно их геологоструктурной позиции разделились. Одни, как, например, Р. А. Хазов [19], рассматривают их в составе Ладожско-Ботнического геоблока, другие, в частности А. М. Беляев и др. [3], развитие гранитоидов Салминского массива связывают с зоной стыка Карельского срединного массива и Северо-Ладожского прогиба карелид. В то же время Л. П. Свириденко [17] оба массива пород относит к территориальным границам укрупненного (за счет Ладожско-Ботнического) Свекофеннского геоблока, связывая непосредственно их формирование с краевой радиальной флексурой Полканова.

Достаточно дискуссионной остается проблема отнесения гранитоидных пород к формации рапакиви. Основными критериями идентификации гранитоидов этой формации являются их пространственная совместимость и генетическое родство. По этим признакам среди рассматриваемых гранитоидов к формации рапакиви можно отнести собственно граниты рапакиви, граниты рапакививидные и на правах ассоциирован-

ных породных составляющих – монцонитоиды, сиениты, граносиениты, гранит-порфиры, а также условно субщелочные граниты типа лезниковских и пержанских. Лезниковские граниты расположены в контуре Коростенского массива. Их геохимическая близость к рапакививидным гранитам не исключает и их генетического родства, что подтверждается проведенными исследованиями. По нашему мнению, формирование гранитов лезниковского типа связано с автотермическими и гидротермальными метасоматическими изменениями рапакививидных пород. Не исключено существование генетической связи этих гранитов и собственно гранитоидов формации рапакиви в целом с редкометалльными гранитами Суцано-Пержанской метасоматической зоны, что открывает новые перспективы в поисках редких металлов в приконтактных участках как Коростенского, так и других массивов такого типа. Целесообразность отнесения пержанских гранитов к коростенскому комплексу в литературе обсуждалась неоднократно [4, 11–13, 18]. В связи с этим гранитоиды, ассоциирующие с собственно гранитами рапакиви, могут быть отнесены к формации или, точнее, надформации рапакиви, что подчеркивает тем самым ее металлогеническое значение.

Для изучения региональных особенностей микроэлементного состава гранитоидов была привлечена аналитическая база по 39 петротипам: 5 и 8 соответственно представляют гранитоиды Выборгского и Салминского плутонов, а 11 и 15 – Коростенского и Корсунь-Новомиргородского. Каждый петротип охарактеризован выборками с определением средних содержаний 35 микроэлементов в основном по результатам приближенно-количественного спектрального, пламенно-фотометрического (K, Na, Li, Rb, Cs) и люминесцентного (U) анализов. Данные анализов были статистически оценены. Применение кластер-анализа позволило сократить количество исследуемых петротипов до 12 генерализованных совокупностей. Результаты повторного иерархического тестирования пород представлены в виде дендрограммы на рис. 1. Ее анализ свидетельствует о разделении гранитоидных пород в пределах положительных значений коэффициентов корреляции на четы-

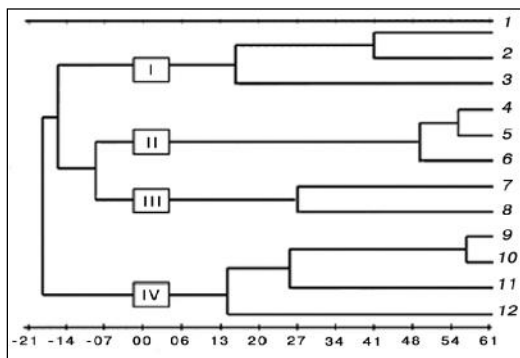


Рис. 1. Дендрограмма корреляционных связей гранитоидных пород УЩ и БЩ

1, 9 – гранит-порфиры дивлинские, граниты лезниковского типа (Коростенский плутон); 2, 4–6 – граниты рапакиви коростенские, корсунь-новомиргородские, салминские, выборгские; 3, 10, 11 – граниты рапакививидные коростенские, корсунь-новомиргородские, салминские; 7, 8 – граниты искренские, граниты жильные и аплитовидные (Корсунь-Новомиргородский плутон); 12 – граниты трахитоидные выборгские. I, II, III, IV – группы пород, геохимически объединенные согласно положительным значениям их коэффициентов корреляции

ре группы. В состав первой вошли исключительно гранитоиды Коростенского плутона: гранит-порфиры дивлинские, рапакививидные безовоидные граниты и граниты рапакиви. Собственно граниты рапакиви трех других плутонов сформировали вторую группу пород, а жильные, в том числе аплитовидные образования Корсунь-Новомиргородского – третью. Четвертая группа представлена рапакививидными гранитами Салминского, Корсунь-Новомиргородского и Выборгского плутонов вместе с трахитоидными, а также геохимически близкими к ним гранитами лезниковского типа.

На представленной факторной диаграмме (рис. 2) для наглядности фигуративные точки элементного состава пород, по результатам кластеризации вошедшие в состав соответствующих групп, оконтурены в виде отдельных полей. Анализ этой диаграммы позволяет сделать следующие выводы. Прежде всего привлекает внимание значительная удаленность от основной группы гранитоидов фигуративных точек наименее и наиболее дифференцированных пород – гранит-порфиров дивлинских и лезниковских гранитов. Такое пространственное размещение точек может означать принадлежность пород к различным

интрузивным фазам. Очевидно, первые из них (дивлинские) являются наиболее ранними образованиями из исследованных кислых разновидностей пород формации рапакиви, фиксируя собой вторую после формирования "гибридных" (как считает большинство исследователей) монцитонидов фазу становления Коростенского плутона. Согласно данным О. В. Зинченко [14], именно дивлинские гранит-порфиры являются наиболее ранними производными коростенской гранитоидной массы. Следует отметить, что среди гранитоидных пород плутона определены и более поздние типы гранит-порфиров, которые нами не исследовались.

Основная часть гранитоидов, а это собственно граниты рапакиви и рапакививидные безовоидные граниты, между которыми существуют постепенные переходы, характеризуют, скорее всего, третью интрузивную фазу. Фигуративные точки состава этих пород характеризуются компактным расположением в центральной части диаграммы. Не исключено, что собственно граниты рапакиви, являющиеся более глубоинной, чем рапакививидные граниты, фацией этой фазы, определяют центры плутонизма. Если это так, тогда на Коростенском плутоне таким центром может быть территория развития гранитоидов Малинского массива, а на Корсунь-Новомиргородском – Корсунь-Шевченковского и Шполянского.

Четвертую фазу, которую, как правило, считают завершающей для гранитоидов Коростенского плутона, определяют метасоматически измененные граниты лезниковского типа. Отдельную пятую фазу, по нашему мнению, представляют жильные и аплитовидные граниты Корсунь-Новомиргородского массива, фигуративные точки которых приурочены к отрицательному концу оси F_2 , что собственно было основанием для выделения их как самых поздних образований. Для пород этой интрузивной фазы характерна связь с таким летучим компонентом, как бор, тогда как для гранитоидов первых трех такая связь установлена лишь с фтором [1, 13]. Это позволяет интерпретировать F_1 как фактор кристаллизационной дифференциации для гранитоидов, фигуративные точки которых расположены в правой части диаграммы, и эманационно-мета-

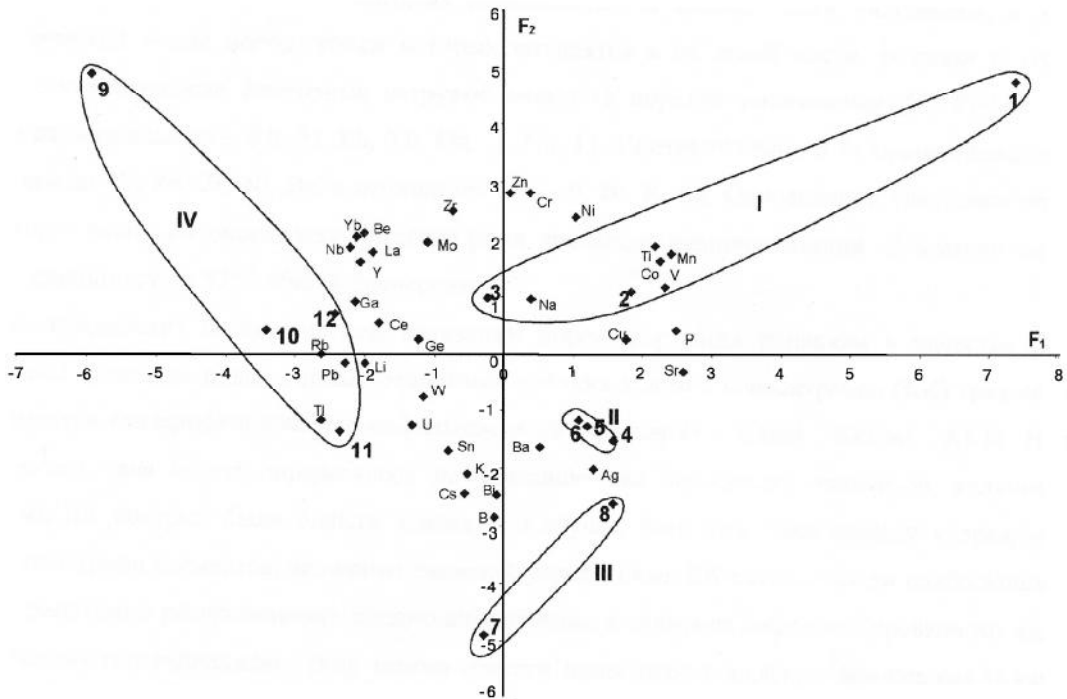


Рис. 2. Факторная диаграмма фигуративных точек микроэлементного состава гранитоидов УЩ и БЩ в плоскости $F_1 - F_2$

Названия гранитоидных пород 1–12 см. на рис. 1. Контурами ограничены поля I, II, III, IV фигуративных точек элементного состава гранитоидов, положительно скоррелированных между собой согласно рис. 1

соматической – для пород, точки которых находятся в ее левой части. В связи с этим значимые положительные факторные нагрузки имеют (в порядке уменьшения) Sr, P, Mn, V, Co, Ti, а значимые отрицательные – Rb, Ti, Pb, Yb, Ga, B, Nb, Li. Соответственно с F_2 положительные факторные нагрузки имеют Cr, Zn, Zr, Ni, Be, а отрицательные – B, Bi, K, Cs. Однозначной трактовки этот фактор не имеет. Скорее всего, он определяет усиление роли процессов калишпатизации. Суммарно на долю обоих факторов приходится до 57 % общей дисперсии.

Для определения геохимической типизации пород формации рапакиви в качестве основы были использованы величины индикаторных отношений средних кларков концентрации (КК) трех ассоциативных групп элементов (siderофильной, халькофильной и литофильной) – $Kk_{sid} : Kk_{chal} : Kk_{lit}$. Наименование геохимического типа пород определялось по названию тех ассоциаций элементов, величины значений усредненных КК которых были больше кларка, а в

случае, если они были меньше кларка, – условно по названию двух групп элементов, величины значений усредненных КК которых были наибольшими. По этому критерию гранитоиды распределились следующим образом: к наименее дифференцированному халькофильно-siderофильному геохимическому типу можно отнести лишь гранит-порфиры дивлинские ($Kk_{sid} : Kk_{chal} : Kk_{lit} = 1,6 : 1,5 : 0,8$). Гранитам рапакиви из всех массивов, а также жильным корсунь-новомиргородским гранитам свойствен главным образом халькофильный профиль геохимической специализации с отношениями КК ассоциативных групп элементов – $0,53 : 1,8 : 1,0$ и $0,4 : 1,2 : 0,9$ соответственно. Для рапакививидных и искренских гранитов, относящихся к комплексному литофильно-халькофильному геохимическому типу, определены такие величины индикаторных отношений: $0,5 : 1,9 : 1,3$ для первых и $0,5 : 2,0 : 1,3$ для вторых. Наиболее дифференцированными среди исследуемых пород оказались граниты лезниковского типа

с отношениями $K_{ksid} : K_{kchal} : K_{kkit} = 0,6 : 2,2 : 1,9$.

Анализ геохимической эволюции гранитов разных фаз формирования пород формации рапакиви свидетельствует о направленном росте во времени халькофильно-литофильной составляющей их специализации (от 1,5 до 2,2 – для первой и от 0,8 до 1,9 – для второй) и соответственно о тенденции к уменьшению роли сидерофильных элементов.

В связи с перспективностью исследуемых пород на эндогенное оруденение нами с учетом рекомендаций В. Д. Козлова [8] была определена степень их редкометалльности. В основе предлагаемого этим автором метода лежит использование кларков концентрации ряда гранитофильных элементов (Pb, Sn, Mo, Nb, Li, Rb, а также F), вычисленных в соответствии с мировыми кларками А. П. Виноградова [7]. Отметим, что средние содержания фтора в гранитах прибалтийских массивов заимствованы у Д. А. Великославинского и др. [1]. Показателем редкометалльности пород служит так называемый индекс накопления концентрации (ИНК), по величине которого гранитоиды УЩ, в соответствии с ранее проведенными исследованиями [13], разделились на три группы: 1) нередкометалльные (бесперспективные) с $ИНК < 5$ кларков; 2) условно редкометалльные (условно перспективные) с $ИНК 5-10$ кларков; 3) редкометалльные (потенциально рудоносные) с $ИНК > 10$ кларков. Исходя из указанных значений ИНК, взятых в качестве эталонных меток для исследуемых пород, выяснилось, что к первой группе по степени редкометалльности принадлежат только жильные граниты корсунь-новомиргородского комплекса и гранит-порфиры дивлинские. Их ИНК соответственно составляют 1,5 и 4,5 кларка. Для коростенских, салминских и выборгских гранитов рапакиви этот показатель находится в пределах второй условно редкометалльной группы пород со значениями кларков 7,7; 8,6; 8,9 соответственно. К этой же группе относятся также рапаквивидные граниты корсунь-новомиргородского комплекса с $ИНК - 9,3$ кларка. Следующую и наиболее перспективную на редкие металлы группу представляют искренские граниты ($ИНК - 10,2$ кларков), граниты рапаквивид-

ные коростенские и салминские ($ИНК - 11,1$ и $13,5$ кларков), трахитоидные граниты ($ИНК - 18,8$ кларков), лезниковские граниты, значение ИНК которых является максимальным среди исследованных петротипов – $23,2$ кларка. Для сравнения, ИНК апогранитов пержанских, с которыми генетически связаны известные месторождения редких металлов, составляет $53,4$ кларка.

Рассмотрим теперь с позиции геохимии геодинамические условия становления гранитоидов формации рапакиви. Прежде всего отметим, что на сегодня практически отсутствует дискуссия относительно принадлежности гранитоидов формации рапакиви к гранитам А-типа. Противоречия между исследователями существуют по поводу геотектонической позиции пород этой формации и этого типа гранитов вообще.

Для геотектонической типизации гранитоидных пород существуют различные классификационные диаграммы, но наиболее приемлемой в нашем случае оказалась диаграмма J. A. Pearce [22] – Rb – (Y+Nb), поскольку она, на наш взгляд, дала наиболее приближенные к геологическим реалиям результаты. На рис. 3 вынесены фигуративные точки средних содержаний индикаторных элементов, характеризующие 12 разновидностей гранитоидов формации рапакиви УЩ и БЦ. Как видим, в контуре поля внутриплитных гранитов, к которым относят и граниты рапакиви [20], находятся наиболее дифференцированные граниты лезниковского типа и рапаквивидные Салминского массива. К группе внутриплитных тяготеют также рапаквивидные граниты корсунь-новомиргородские и выборгские трахитоидные граниты. Фигуративные точки всех других разновидностей исследованных нами пород, а это гранит-порфиры, граниты рапакиви корсунь-новомиргородские, салминские, выборгские, искренские и аплитовидные граниты, находятся одновременно и в поле неопределенности, и в контуре поля постколлизии гранитов. Не означает ли это, что у части гранитоидных пород этой формации, кстати, менее всего дифференцированной, сохранились геохимические признаки, свойственные постколлизии гранитам? В этой связи следует отметить, что, очевидно, не случайно гранитоиды формации ра-

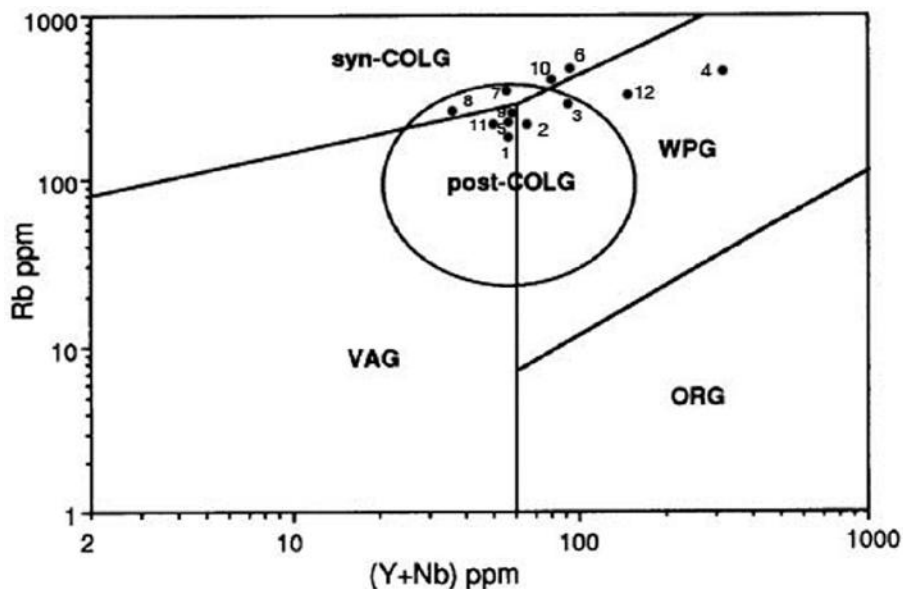


Рис. 3. Дискриминационная диаграмма Rb – (Y+Nb) J. A. Pearce (1984) [22]

Поля на диаграмме: WPG – внутриплитные граниты; syn-COLG – коллизионные граниты; VAG – граниты вулканических дуг; ORG – граниты океанических хребтов; post-COLG – постколлизионные граниты. Названия гранитоидных пород 1–12 см. на рис. 1

пакиви, простирающиеся вдоль окраинной части ВЕП, характеризуются утолщенной, по Е. В. Шаркову [20], земной корой.

Вместе с тем значительный возрастной перерыв во времени (для пород УЩ – в 200 млн лет), зафиксированный между этими гранитами, которые, согласно диаграмме, в какой-то степени можно отождествлять как с посторогенными образованиями, так и собственно орогенными, не позволяет, в соответствии с данными [23], относить их ни к первым, ни ко вторым. По указанному критерию – это анорогенные гранитоиды. Противоречие снимается, если предположить, что образование гранитоидов связано с отдаленными (финальными) отголосками коллизионных процессов во время погружения гипотетических плит (или микроплит) под Восточно-Европейский кратон (Фенноскандия + Сарматия). На наш взгляд, в местах их максимального погружения в мантию в связи с выборочным изменением геодинамических условий от режима сжатия к растяжению могли формироваться локальные плюмы, над которыми и возникали отдельные массивы пород анортозит-рапакивигранитной формации.

Следует ли в таком случае образование

этих уникальных пород субплатформенного этапа развития земной коры связывать с внутриплитным магматизмом? Вопрос открыт. Отметим, что в поле внутриплитных гранитов расположились фигуративные точки исключительно метасоматически измененных разновидностей указанной формации. Это означает, что отнесение их к этому геотектоническому типу может быть ошибочным из-за изменений первичных геохимических характеристик индикаторных элементов вследствие усиления миграционных процессов. Другими словами, имеются определенные основания гранитоиды формации рапакиви в целом относить к постколлизионным образованиям, тем более что большинство породных разновидностей (см. диаграмму) находится в границах контура постколлизионных гранитов.

Основные выводы

Результаты изучения особенностей распределения химических элементов в 39 ведущих петротипах гранитоидов формации рапакиви показали, что их формирование является следствием проявления четырех этапов кислого магматизма. Определены

корреляционные взаимосвязи между породными разновидностями гранитоидов обоих щитов. Из числа исследованных выявлены наиболее перспективные на редкие металлы петротипы – это граниты лезниковские с ИНК – 23,2 кларка. На наш взгляд, данные породы вместе с гранитоидами пержанского комплекса являются метасоматической фацией формации рапакиви, и их следует относить к ней. Выделены три типа геохимической специализации пород: халькофильно-сидерофильный, халькофильный, литофильно-халькофильный. Можно предположить, что гранитоиды формации рапакиви по своему геотектоническому положению относятся к постколлизийным образованиям.

1. *Анортозит-рапакивигранитная* формация / Д. А. Великославинский, А. П. Биркис, О. А. Богатиков и др. – Л., 1978. – 295 с.
2. *Беляев А. М.* Минералого-геохимическая специализация гранитов рапакиви Выборгского массива // Вестн. ЛГУ. – 1983. – Вып. 1, № 6. – С. 17–26.
3. *Беляев А. М., Львов Б. К.* Минералого-геохимическая специализация гранитов рапакиви Салминского массива // Там же. – 1981. – № 6. – С. 15–24.
4. *Безпалько Н. А.* Петрологія і акцесорні мінерали гранітів та метасоматитів Північної Волині. – К.: Наук. думка, 1970. – 164 с.
5. *Билибина Т. В.* О петрологии приладожских рапакиви // Бюл. ВСЕГЕИ. – 1960. – № 2. – С. 124–137.
6. *Бухарев В. П.* Эволюция докембрийского магматизма западной части Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1992. – 152 с.
7. *Виноградов А. П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
8. *Козлов В. Д.* Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометалльных провинций. – М.: Недра, 1985. – 304 с.
9. *Ларин А. М.* Рапакивигранитсодержащие магматические ассоциации: геологическое положение, возраст, источники: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2008. – 46 с.
10. *Левковский Р. З.* Рапакиви. – Л., 1975. – 224 с.
11. *Личак И. Л.* Петрология Коростенского плутона. – Киев: Наук. думка, 1983. – 245 с.
12. *Молявко В. Г., Павлов Г. Г., Серга А. Ю.* О соотношении гранитоидов северо-западной части Украинского щита по результатам количественного анализа петрогеохимических данных // Вопросы прикладной геохимии и петрофизики. – Киев, 1977. – С. 44–54.
13. *Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання* / М. І. Толстой, Ю. Л. Гасанов, Н. В. Костенко та ін. – К.: ВПЦ "Київ. ун-т", 2003. – 329 с.
14. *Петрология, геохимия и рудоносность интрузивных гранитоидов Украинского щита* / К. Е. Есипчук, Е. М. Шеремет, О. В. Зинченко и др. – Киев: Наук. думка, 1990. – 234 с.
15. *Свєшніков К. І., Сіворонов А. О.* Области докембрийської тектоно-магматичної активізації фундаменту Східно-Європейської платформи // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія. – 2004. – Вип. 31–32. – С. 18–22.
16. *Свириденко Л. П.* Петрология Салминского массива гранитов рапакиви (в Карелии). – Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1968. – 115 с.
17. *Свириденко Л. П.* Геодинамика и энергетический аспект бимодального магматизма // Граниты и эволюция Земли: геодинамическая позиция, петрогенезис и рудоносность гранитоидных батолитов: Материалы междунар. геол. конф. – Улан-Удэ, 2008. – С. 212.
18. *Скобелев В. М.* Петрохимия и геохронология докембрийских образований Северо-Западного района Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1987. – 140 с.
19. *Хазов Р. А.* Металлогения Ладожско-Ботнического геоблока Балтийского щита. – Л.: Наука, 1982. – 192 с.
20. *Шарков Е. В.* Внутриплитные магматические системы середины протерозоя на примере анортозит-рапакивигранитных комплексов Балтийского и Украинского щитов // Рос. журн. наук о Земле. – 1999. – Т. 1, № 4. – С. 311–337.
21. *Щербаков И. Б.* Петрология Украинского щита. – Львов, 2005. – 364 с.
22. *Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle F. G.* Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol. – 1984. – Vol. 25. – P. 956–983.
23. *Sylvester P. J.* Post-collisional alkaline granites // J. Geol. – 1989. – Vol. 97. – P. 261–280.

Киев. нац. ун-т им. Тараса Шевченко, Статья поступила
Киев 12.11.10
E-mail: knv@univ.kiev.ua